

Etude expérimentale et phénoménologique de la rupture différée de composites pultrudés UD sous chargements permanents.

Experimental and phenomenological study of pultruded UD composites' creep rupture under static loading.

Natalia Kotelnikova-Weiler^{1,2,3} et Jean-François Caron²

1 : UMR Navier, Structures Hétérogènes, Ecole des Ponts ParisTech
Université Paris-Est – 6 – 8 av. Blaise Pascal Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée CEDEX 2

2 : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, France

3 : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, France
e-mail : natalia.kotelnikova@enpc.fr, caron@enpc.fr

Résumé

Les applications structurelles des matériaux composites sont soumises à des normes de sécurité très strictes. La connaissance exacte des modes et des causes de ruptures différées est de fait de première importance. Des composites pultrudés fibre de verre / vinylester ont été étudiés sous chargements permanents. Des joncs ont été testés en flexion, torsion-flexion et flexion-compression. Ces essais ont été menés à températures ambiante et élevée (60°C). Les résultats expérimentaux montrent deux types de mode de rupture pour différents chargements : progressif et quasi-instantané. L'utilisation d'essais en torsion permet une meilleure identification du rôle de la matrice dans le phénomène de rupture différée des matériaux composites. Un modèle prenant en compte le comportement viscoélastique des résines est en cours de développement pour prédire la durée de vie des matériaux composites en chargement permanent.

Mots Clés : composite pultrudé, rupture différée, chargement combiné, torsion, flexion, température élevée

Key words : pultruded composite, creep rupture, combined loading, torsion, bending, elevated temperatures

1. Introduction

L'intérêt pour les matériaux composites dans divers domaines comme l'aéronautique et le génie civil ne cesse de s'accroître. Ces matériaux offrent aux concepteurs la possibilité d'associer formes et fonctions au sein de systèmes et de structures innovantes. Les nouvelles conceptions et méthodes de production permettent une extension des possibilités techniques et une meilleure conjugaison de besoins parfois opposés (poids, fonction, propriétés mécaniques) que les matériaux homogènes traditionnels ne peuvent proposer. Faible poids, anisotropie, hautes performances mécaniques et multifonctionnalité sont les principaux avantages des polymères renforcés [FRP : Fibre Reinforced Polymers]. Le développement des techniques de pultrusion ont rendu ces matériaux utilisables économiquement pour des applications de génie civil. Néanmoins dans beaucoup de pays, les codes et standards pour les structures composites ne sont pas totalement établis. Même si les calculs de structures en FRP sont maîtrisés, l'estimation de la durée de vie ainsi que les coefficients de sécurité doivent encore être précisés. L'usage présent des matériaux composites est souvent dans le cadre de composants non porteurs où comme renforcement de structures béton ou acier existantes, et lorsqu'une structure entièrement composite est conçue, son chargement initial est limité à 30% de sa contrainte à rupture comme prescrit dans le code de calcul Eurocomp. Pour permettre une estimation la plus juste possible de la durée de vie, il est essentiel de comprendre le rôle de chacun des constituants du composite dans sa rupture différée, et de construire un modèle à la fois efficace et sensible aux paramètres. Ces modèles devront lier les conditions environnementales et les propriétés mécaniques d'un composite à sa réponse mécanique et son comportement à long terme.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la modélisation de la baisse de résistance des composites sujets à un chargement permanent en traction. Même si le modèle en cours de développement n'est pas

présenté dans cet article, l'étude s'est particulièrement concentrée sur les modèles de type « Shear-lag » de par leurs efficacité et simplicité d'implémentation. Ohno et al. en 1999 [1] ont conçu un modèle permettant l'estimation de la durée de vie d'un composite selon son chargement en traction. Koyanagi et al. en 2007 [2] ont également développé un modèle similaire. Zhou et al. en 2002 [3] et 2004 [4] ont mené une étude expérimentale d'un composite modèle composé de fibres de graphite dans une matrice époxy. Une utilisation de la spectroscopie Raman leur permet de tester leurs spécimens en traction à des températures comprises entre 20°C et 80°C, pour fournir une vision micromécanique du processus de fluage et de rupture différée. La plupart des modèles cités considèrent une matrice et des fibres élastiques ainsi qu'un arrangement périodique des fibres. Néanmoins, et nous le verrons plus tard, la viscoélasticité de la matrice est responsable de la rupture différée. I. Beyerlein, L. Phoenix, C.M. Landis, R.M McMeeking pour n'en citer que quelques uns, ont travaillé au fil des années au développement de plusieurs modèles shear-lag simulant une distribution stochastique des résistances des fibres et différents comportements de la matrice. L'article de 1998 par I. Beyerlein, L. Phoenix and R. Raj [5] présente un modèle 2D prenant en compte la viscoélasticité de la matrice, une distribution stochastique des résistances des fibres et la possibilité de simuler dans le temps des ruptures de fibre successives. En 2009, Blassiau et al. [6] ont développé un modèle micromécanique 3D par éléments finis, qui simule le comportement viscoélastique de la matrice, une distribution stochastique des résistances des fibres et les ruptures de l'interface entre une fibre et la matrice environnante.

Notre travail vise à étudier les différents modes de rupture et à comprendre le rôle des constituants d'un composite sur le type de rupture et sur l'espérance de vie d'une structure soumise à un chargement donné. Nous présenterons premièrement l'étude expérimentale menée pour explorer les différents mécanismes de rupture. Cette étude nous a permis d'identifier deux modes de rupture distincts. Dans une seconde partie, nous montreront les résultats d'une campagne d'essai plus importante qui comprend des essais de fluage en chargement combiné torsion-flexion à différentes températures.

2. Identification des modes de rupture statique

1.1 Echantillons expérimentaux

Les échantillons sont des joncs unidirectionnels faits de fibre de verre E et d'une résine vinylester. Nous avons tout d'abord identifié les propriétés mécaniques comme la résistance, la déformation à rupture, le module d'Young, la fraction volumique de fibre et la température de transition vitreuse. Afin de déterminer la résistance des échantillons, un essai en flexion quatre points a été réalisé sur la machine Instron (Fig. 3d). Pour ne pas écraser l'échantillon, des patins en silicone furent placés sous les points d'appuis intérieurs. La déformation a été soit mesurée par l'utilisation de jauges de déformation, soit calculée à partir des données de déplacement de la traverse. Des essais en flexions fournirent des informations sur la résistance en flexion, la déformation à rupture et le module d'Young. Des essais spécifiques (perte au feu et spectroscopie dynamique) ont été effectués chez un laboratoire partenaire pour déterminer la fraction volumique de fibres et la température de transition vitreuse. Les résultats de la spectroscopie dynamique sont présentés dans la figure ci-dessous (Fig 1.)

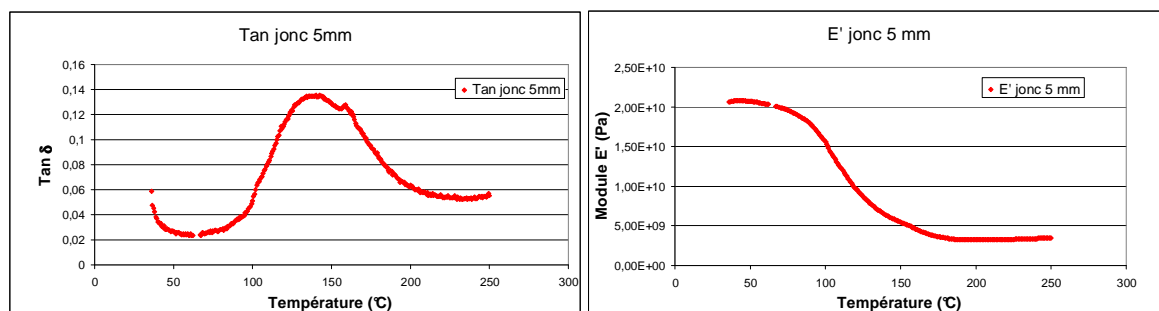


Fig. 1: Résultats de la Spectroscopie Dynamique.

Des essais supplémentaires furent effectués pour déterminer la variation de la résistance en flexion en fonction de la température. La résistance a tendance à décroître, mais ce phénomène est difficilement quantifiable à cause de la dispersion des résultats. La Figure 2 présente les résultats de ces essais.

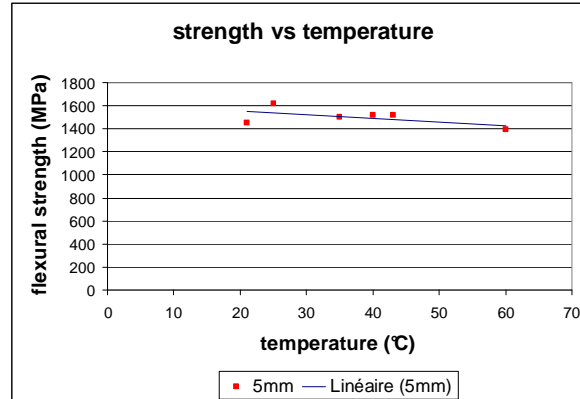


Fig. 2: Evolution de la résistance en flexion en fonction de la température.

Ces essais montrent qu'entre 20°C et 60°C, les propriétés mécaniques des matériaux étudiés peuvent être considérées comme constantes. Ce domaine de température sera considéré dans cette étude car il correspond au domaine d'application en température de ce type de matériau composite.

Les propriétés mécaniques sont résumées dans le tableau suivant (Tableau 1).

Tableau 1: Propriétés mécanique du matériau étudié.

Diamètre du jonc	σ_{\max}	ϵ_{\max}	E	V_f	T_g
5mm	1499MPa	2.6%	56GPa	56.08%	137°C

1.2 Protocole expérimental

Le partenaire industriel du projet a observé un nouveau mode de rupture dans l'une de leurs applications. Dans cette application, le matériau est principalement soumis à de la flexion. Le mode de ruine observé est une rupture différée et abrupte, qui conduit à la séparation instantanée de l'échantillon en deux. Afin d'identifier les chargements entraînant ce mode de rupture spécifique, une série d'essais sous différents chargements fût réalisée. Dans cette section, les dispositifs expérimentaux de cette série sont décrits.

Les tests en flexion ont été effectués sur la même machine que le test de caractérisation de la résistance du matériau. Les échantillons ont été testés en flexion quatre points.

Les essais en torsion-compression ont été effectués sur une machine de test hydraulique MTS (Fig 3b). Pour ces essais, la section des échantillons était localement réduite au milieu de l'échantillon, comme le montre la Figure 4a. Pour appliquer le couple, les échantillons étaient insérés dans des accroches en aluminium pourvues d'une vis sur le côté. Une surface plane usinée sur un côté du jonc permettait le verrouillage dans l'accroche en aluminium, empêchant tout glissement. Un schéma de principe est donné Figure 4b. Au moyen de cette même machine, mais en utilisant un système de verrouillage différent (voir Figure 4c), un chargement combiné torsion-traction a pu être appliqué aux échantillons.

Les essais en torsion pure furent réalisés avec une machine spécifique présentée en Figure 3c. A l'aide de cet outil, une torsion donnée (mesurée en degrés) peut être appliquée à un échantillon d'une certaine longueur.

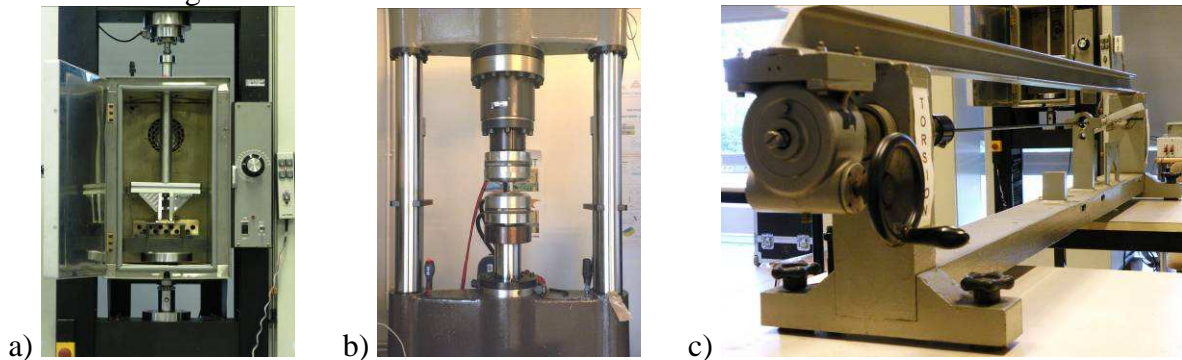


Fig. 3: a) Banc d'essai Instron ; b) Machine hydraulique MTS ; c) Outil de test en torsion.

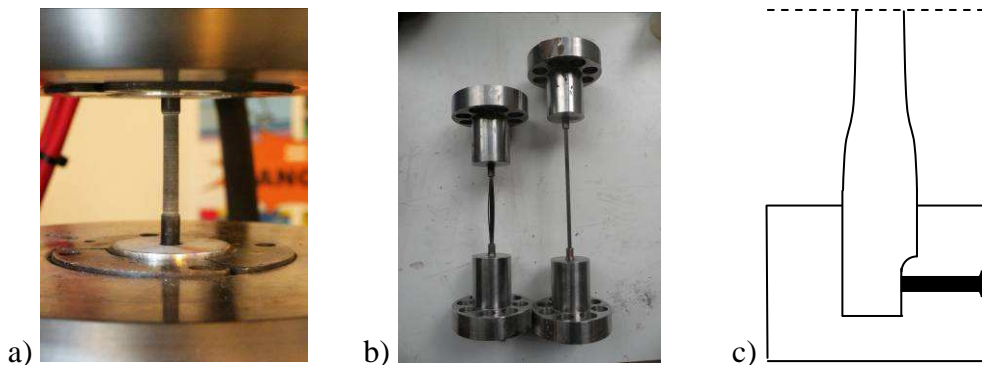


Fig. 4: a) Accroche en aluminium ; b) Verrouillage MTS ; c) Accroches spécifiques pour les essais de torsion-traction.

1.3 Identification de différents modes de rupture

Les modes de rupture identifiés lors de ces essais présentent de fortes différences. Les essais en flexion montrèrent une ruine du matériau progressive se produisant par détachement continu de fins paquets fibres-matrice (Fig. 5a)). Les essais en torsion pure présentèrent des fissures longitudinales (Fig. 5b)). Combiné à la traction, la torsion entraîne la ruine du matériau par la séparation de larges paquets de matériau le long de fissures longitudinales continues (Fig. 5c)). Lors d'essais de compression pure, la rupture est une rupture de type kink-band, et les deux morceaux de l'échantillon restent accrochés ensemble (Fig. 5d)). Par contre, lors des essais en torsion compression, les échantillons cassèrent abruptement en deux lorsqu'un certain couple était appliqué pour un chargement en compression donné (Fig. 5e)).

Dans aucun autre cas une telle destruction instantanée de l'échantillon (telle qu'on peut le voir dans les figures 5e) et 5f)) n'a été observée. Il s'agit du seul cas où la rupture fût à la fois abrupte et conduisit à la séparation instantanée en deux morceaux de l'échantillon (la résistance résiduelle étant nulle). Il est intéressant de remarquer que la torsion-flexion et la torsion-compression conduisent à deux modes de rupture très différents. L'étape suivante était d'étudier l'influence de la torsion sur le processus de rupture dans des cas de chargement combinés torsion-flexion où des sollicitations en torsion-traction et torsion-compression apparaissent en même temps.

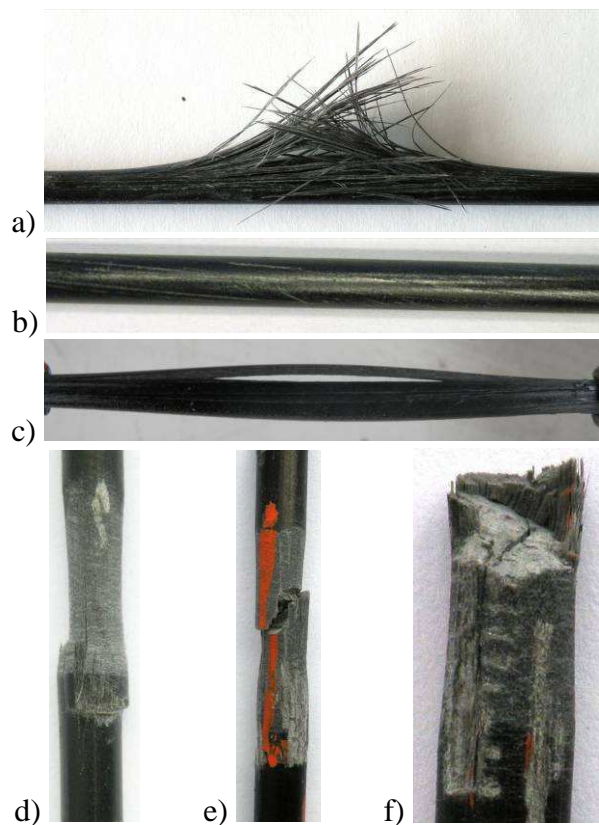


Fig. 5: Mode de ruine en a) Flexion; b) Torsion pure; c) Traction-torsion combinées; d) Compression pure ; e) Torsion-compression combinées; f) Détail de la rupture torsion-compression combinées.

3. Tests de rupture différée sous chargements combinés en torsion-flexion

1.4 Protocole expérimental

La torsion joue clairement un rôle important dans la modification du mode de ruine du matériau, comme le montre la section précédente. Comme dans l'application industrielle étudiée le matériau est principalement soumis à la flexion, des essais en torsion-flexion furent effectués, avec pour but l'étude de la rupture différée, et non la rupture statique.

Pour les essais en torsion-flexion, un montage expérimental spécifique a été utilisé. Dans les paragraphes suivants, nous nous référerons à ce dispositif par le terme d'« élastica », car la forme de l'échantillon chargé est celle de l'élastica d'Euler post-flambée. Pour fabriquer l'« élastica » présentée en figure 6a), nous avons joint les deux extrémités d'un jonc. Nous les avons ensuite attachées au moyen d'accroches en aluminium de la même façon que précédemment (l'ajout d'une vis permettant d'immobiliser le jonc et d'empêcher les glissements). En tournant l'une des extrémités à 360° par rapport à l'autre (un tour complet), une torsion est appliquée à l'échantillon. Le couple appliqué dépend donc directement de la longueur du jonc.

Certains échantillons ont cassé en moins d'une minute. Afin d'enregistrer avec précision la durée de vie de ces échantillons, des fils électriques ont été placés sur les spécimens comme le montre la Figure 6a). Les variations de tension des fils sont mesurées. Lors de la rupture, un des fils est cassé, ce qui modifie la tension observée.

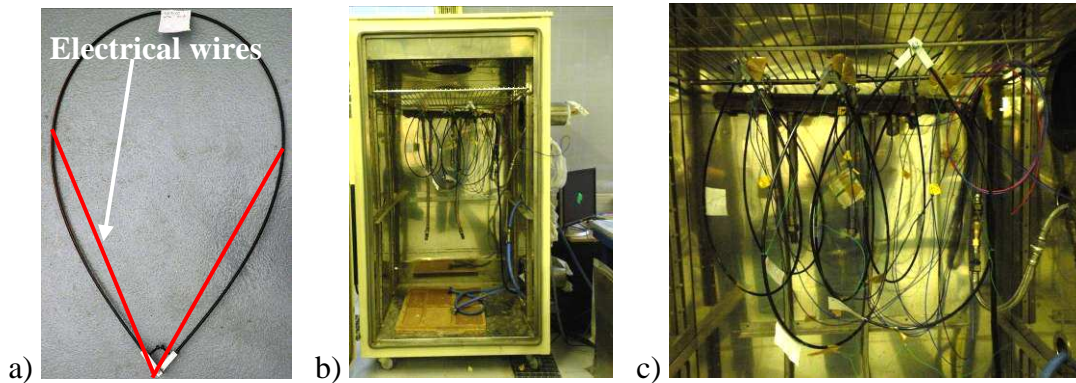


Fig. 6: a) Echantillon "Elastica"; b) Four à température contrôlée; d) Echantillons "Elastica" dans le four.

Les échantillons furent placés dans un four à une température stabilisée à 60°C . La rupture est enregistrée pour différents chargement en flexion et torsion. L'espérance de vie peut alors être exprimée comme la probabilité de rupture au bout d'un certains temps pour un chargement donné.

Une elastica possède un chargement complexe, qui varie en fonction de son abscisse curviligne. La longueur du jonc utilisé détermine la sollicitation maximum en flexion appliquée au milieu de l'échantillon ainsi que le couple. Les graphiques suivant présentent les variations des forces et moments appliqués en fonction de l'abscisse curviligne de l'échantillon (Fig. 7). Le premier graphique présente les efforts normalisés dans le cas général (Fig. 7a)) alors que le second (Fig. 7b)) et troisième (Fig. 7c)) graphiques présentent un ordre de grandeur des efforts appliqués sur un échantillon d'une certaine taille. Nous avons choisi ici de présenter un cas où le moment de flexion maximal au milieu de l'échantillon vaut 60% du moment de flexion ultime. Cette condition permet d'obtenir la longueur de jonc à utiliser et donc la torsion obtenue. Ce couple représente environ 50% de la résistance statique en torsion. Nous avons également calculé la contrainte de cisaillement due à l'effort de cisaillement. Mais elle ne représente qu'environ 2% du cisaillement dû à la torsion, et n'est donc pas représentée sur ces graphiques.

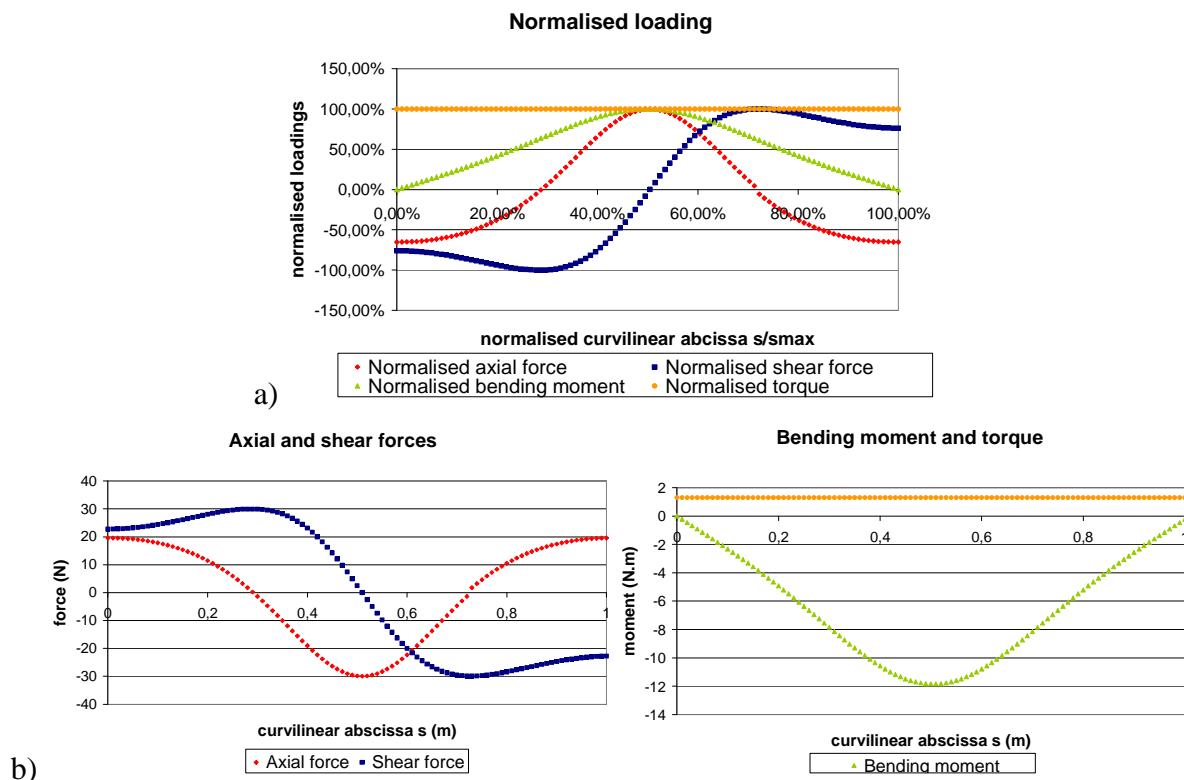


Fig. 7: a) Efforts normalisés lors d'un essai « élastica »; b) Efforts axiaux et de cisaillement, moment de flexion et couple dans l'échantillon avec un moment de flexion maximal de 60% du moment de flexion ultime.

4. Résultats

1.5 Observations expérimentales

Des ruptures abruptes mais différées ont été observées sur les échantillons en torsion-flexion. Une partie de la section au niveau de la rupture présente une cassure nette. Cela correspond sans doute à la partie de jonc en torsion-compression. Le reste de la section ne présente pas les fissures longitudinales observées lors des essais en torsion-traction, mais plutôt une rupture concentrée avec des bords effilochés qui rappelle la rupture obtenue en flexion pure (Fig. 8a)). Nous avons également réalisé des essais élastica sans torsion, afin de pouvoir comparer les modes de ruine. Dans ces cas de flexion pure, le jonc casse comme l'on s'y attendait, progressivement et de la même façon que les échantillons testés lors des essais flexion quatre points (Fig. 8b)).

Nous pouvons donc conclure que l'application de torsion entraîne la modification du mode de rupture en flexion. Les recherches sur le couple nécessaire pour obtenir la rupture sont toujours en cours.

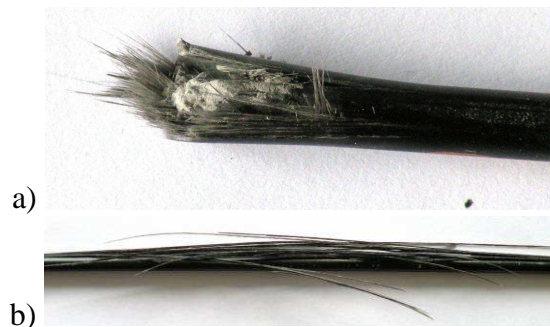


Fig. 8: a) Rupture d'un élastica avec torsion; b) Rupture d'un élastica sans torsion

Le dispositif d'acquisition nous permet d'enregistrer l'espérance de vie des différents échantillons pour différents cas de chargement. La Figure 9 présente les résultats obtenus pour des échantillons chargés à 60% et 70% de leur moment de flexion ultime (au milieu de l'échantillon) avec une rotation de 360° appliquée entre les deux extrémités du jonc. Nous pouvons observer qu'une plus grande sollicitation en torsion conduit à une réduction considérable de l'espérance de vie.

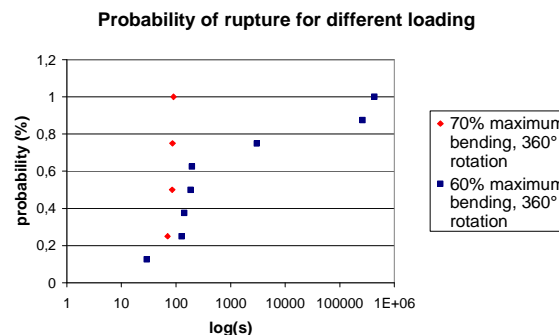


Fig. 9: Espérance de vie d'échantillons soumis à différents chargements ;

1.6 Processus micromécanique de la rupture différée

Le mécanisme microscopique généralement admis pour expliquer la rupture différée est le suivant : lorsqu'un composite unidirectionnel est chargé, un certain nombre de ruptures de fibres vont se

produire, la résistance des fibres n'étant pas distribuée uniformément. Une fibre aura des points faibles dus à des craquelures et des défauts dans sa structure. Lorsque le chargement atteint un niveau suffisant, ces sections vont céder. Autour des extrémités des fibres (qui existent quel que soit le niveau de chargement) et des fibres cassées, la matrice est chargée en cisaillement, et redistribue la charge des fibres cassées sur les fibres intactes suffisamment proches pour être affectées. La viscoélasticité de la matrice entraîne une relaxation de la contrainte de cisaillement, ce qui conduit à l'expansion du profil de surcharge des fibres voisines intactes (et qui cause également un comportement global viscoélastique). En considérant une de ces fibres voisine intacte, cette dernière peut être soumise à deux profils de surcharges différents, dus à deux ruptures différentes, qui ne se recouvrent pas (Fig. 10a)). Même si l'amplitude de chaque profil de surcharge décroît avec le temps, leur expansion respective peut conduire à leur superposition (Fig. 10b)). Dans cette zone de superposition, la fibre voit son niveau de contrainte augmenter avec le temps, ce qui peut conduire à la rupture de cette fibre. Chaque nouvelle rupture affaiblit l'ensemble du composite et réduit sa résistance. Cela entraîne, à terme, la ruine du matériau par rupture différée. Un modèle similaire à celui décrit en [5] est en cours de réalisation.

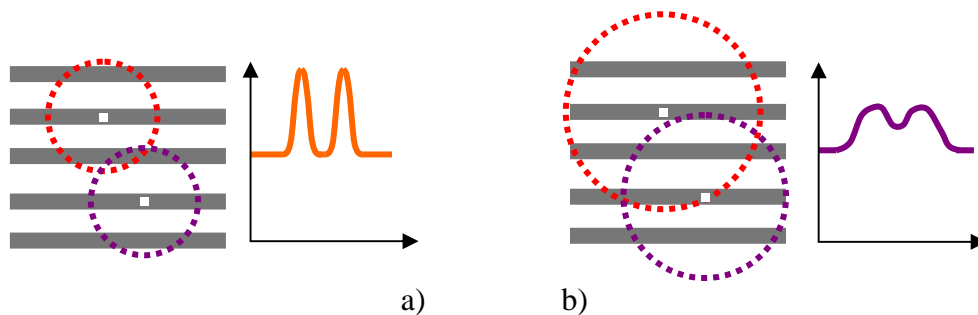


Fig. 10: Le schéma de gauche représente deux fibres cassées et les profils de surcharge causés par leur rupture sur les fibres voisines intactes. A droite, les profils de surcharge entre les deux fibres se sont étendus au cours du temps et se sont superposés. a) juste après la rupture ; b) après une longue période.

Lorsqu'un cisaillement supplémentaire est ajouté par la torsion, ce processus s'accélère et conduit à la localisation de la rupture. La caractéristique de relaxation de la matrice dans le temps dépend directement du niveau de cisaillement appliqué, donc lorsqu'un cisaillement additionnel dû à la torsion est appliqué, la relaxation de la matrice est stimulée, ce qui conduit à des ruptures plus rapides des fibres. Ces tests combinés révèlent donc les qualités ou les défauts d'une matrice en appliquant un cisaillement plus important. Des propriétés viscoélastiques différentes de chaque matrice conduiront à une durée de vie différente dans ces tests.

5. Conclusion et perspectives

Nous avons étudié différents modes de rupture dans des cas de chargement simples et combinés. Deux types de ruptures ont été identifiés : une rupture progressive en flexion et une rupture abrupte si l'on rajoute de la torsion. Nous avons montré que la torsion modifiait le mode de rupture et réduit très sévèrement la durée de vie de l'échantillon chargé. Les essais en torsion-flexion permettent de révéler les qualités et les défauts d'une matrice car elle est directement soumise à des niveaux de contraintes importants. Le cisaillement dû à la torsion combiné au cisaillement local dû aux ruptures des fibres entraîne l'accélération de la rupture différée.

Afin de prédire l'espérance de vie d'un composite unidirectionnel, un modèle simulant le comportement viscoélastique de la matrice est requis. Ce modèle devrait permettre la réalisation de calculs en chargement combinés comme la torsion-flexion. Combiné avec les résultats des essais précédents, une identification précise du comportement in-situ de la matrice devrait être possible.

Alors, les calculs dans d'autres cas de chargement devraient en être améliorés. Un modèle de ce type est en cours de développement, basé sur les travaux de I.Beyerlein et ses collègues [5].

Références

- [1] N. Ohno, T and Miyake, "Stress relaxation in broken fibers in unidirectional composites: modelling and application to creep rupture analysis", *International Journal of Plasticity*, (15) 167-189, 1999.
- [2] J. Koyanagi, H. Hatta, F. Ogawa and H.Kawada, "Time-dependent Reduction of tensile strength caused by interfacial degradation under constant strain duration in UD-CFRP", *Journal of Composite Materials*, (41) n°25 3007-3026, 2007.
- [3] C.H. Zhou, L. S. Schadler and I.J. Beyerlein, "Time-dependent micromechanical behaviour in graphite/epoxy composites under constant load: a combined experimental and theoretical study", *Acta Materialia*, (50) 365-377, 2002.
- [4] C. H. Zhou, L. S. Schadler and I.J. Beyerlein, "Stress concentrations in Graphite/epoxy model composites during creep at room temperature and elevated temperatures", *Journal of Composites Materials*, (38) n° 5, 2004.
- [5] I.Beyerlein, L. Phoenix and R. Raj, "Time evolution of stress redistribution around multiple fiber breaks in a composite with viscous and viscoelastic matrices", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 35, no 24, pp 3177-3211, 1998
- [6] S. Blassiau, A. Thionnet and A. R. Bunsell, "Three-dimensional analysis of load transfer micro-mechanisms in fibre/matrix composites", *Composites science and technology*, (69) 33-39, 2009.
- [7] G. Foret, « Effets d'échelle dans la rupture des composites unidirectionnels », PhD thesis of the Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995
- [8] C.M. Landis, M.A. McGlockton and R.M. McMeeking, "An improved shear-lag model for broken fibers in composite materials", *Journal of Composite Materials*, vol. 33, 1999
- [9] C.M. Landis, R.M. McMeeking, "Stress concentrations in composites with interface sliding, matrix stiffness and uneven fiber spacing using shear lag theory", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 36, pp 4333-4361, 1999
- [10] C.M.Landis, I.J.Beyerlein, R.M. McMeeking, "Micromechanical simulation of the failure of fiber reinforced composites", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 48, pp. 621-648, 2000
- [11] John A. Nairn, "On the use of shear-lag methods for analysis of stress transfer in unidirectional composites", *Mechanics of Materials*, vol. 26, pp. 63-80, 1997
- [12] T. Okabe, N. Takeda, Y. Kamoshida, M. Shimizu, W. A. Curtin, "A 3D shear-lag model considering micro-damage and statistical strength prediction of unidirectional fiber-reinforced composites", *Composites science and technology*, vol. 61, pp. 1773-1787, 2001
- [13] F. Richard and D.Perreux, "The safety-factor calibration of laminates for long-term applications : behaviour model and reliability method", *Composites Science and Technology*, (61) 2087-2094, 2001.